

Abbildung 55: Die HERMES-Kollaboration vor der Osthalle am letzten Tag des HERA Betriebs am 30. Juni 2007.

HERMES-Experiment

Beteiligte Institute: NIKHEF und Vrije Universiteit Amsterdam, Univ. of Michigan Ann Arbor, ANL Argonne, Univ. und INFN Bari, Beijing Univ., Univ. of Colorado Boulder, JINR Dubna, Univ. Erlangen-Nürnberg, Univ. und INFN Ferrara, INFN Frascati, Univ. Gent, Univ. Gießen, Univ. Glasgow, DESY Hamburg, Univ. Sci. Technol. Hefei, P. N. Lebedev Inst. Moscow, IHEP Protvino, Univ. Regensburg, INFN und Ist. Sup. Sanità Rome, St. Petersburg Nucl. Phys. Inst., Tokyo Inst. Technol., Univ. of Illinois Urbana-Champaign, TRIUMF Vancouver, Andrzej Soltan Inst. Warsaw, Yerevan Phys. Inst., DESY Zeuthen.

Sprecher: J. Stewart, DESY (bis Juni 2007); E.R. Kinney, University of Colorado (seit Juli 2007)

Die Datennahme am HERMES-Experiment verlief sehr erfolgreich bis zum Ende des HERA Bertriebs im Juni 2007. Zusätzlich zum voll funktionsfähigen HERMES Spektrometer kam ein neu installierter Rückstoß-Detektor zum Einsatz. Von den über 100 Millionen tief-inelastischen Streuereignissen (Deep Inelastic Scattering, DIS), die seit Beginn des HERMES-Experiments im Jahre 1995 aufgezeichnet wurden, stammt fast ein Drittel aus dem letzten Jahr des HERA Betriebs (Abbildung 56 zeigt die gesammelte Statistik aus den Jahren 2006 und 2007). Dieser sehr große Datensatz, welcher die aufgezeichneten Streuereignisse zwischen polarisierten Positronen und unpolarisiertem Wasserstoff und Deuterium enthält, wird viele neue Analysen mit großer Präzision ermöglichen.

Die Analysen dieses Datensatzes werden sich vor allem auf harte, exklusive Reaktionen, in denen alle Teilchen im Endzustand der Reaktion gemessen werden, konzentrieren. Vor der Installation des Rückstoß-Detektors mussten die Energie und der Impuls des langsamen Rückstoß-Protons aus den gemessenen kinematischen Größen der anderen Teilchen berechnet werden. Die Genauigkeit dieser Methode ist durch die Energieauflösung des HERMES-Spektrometers begrenzt. Daher kommt es vor, dass zusätzliche Teilchen produziert werden, die jedoch weder detektiert noch anhand der



Abbildung 56: Die von HERMES gesammelte Statistik in den Jahren 2006 und 2007. Gezeigt sind die Anzahl der tief-inelastischen Streuereignisse des HERA Elektron- bzw. Positron-Strahls mit unpolarisierten Wasserstoff bzw. Deuterium Targets.

berechneten kinematischen Größen aufgelöst werden können. Der Einbau des Rückstoß-Detektors erlaubt nun einerseits die direkte Messung von Energie und Impuls des Rückstoß-Protons und kann andererseits viele der zusätzlich produzierten Teilchen direkt nachweisen, so dass exklusive Reaktionen eindeutig identifiziert werden können.

Die Messung exklusiver Reaktionen ist vor allem dadurch motiviert, dass sie zum erstenmal die Möglichkeit bietet, die Impulsverteilung der Quarks im Nukleon in Abhängigkeit von ihrem Ort zu studieren. Insbesondere ermöglicht dies den ersten Zugang zum Bahndrehimpuls der Quarks im Nukleon, welcher einen wichtigen Beitrag zum Gesamtdrehimpuls des Protons liefern kann. Die im Rahmen der Theorie einfachste, exklusive Reaktion ist die tief-virtuelle Compton Streuung (*Deeply Virtual Compton Scattering*, DVCS), in der der Endzustand der Reaktion aus dem gestreuten Positron, dem Rückstoß-Proton und einem hochenergetischen Photon besteht.

Die Analyse der Daten, die mit dem transversal polarisierten Wasserstoff Target, welches im Jahre 2005 dem Rückstoß-Detektor weichen musste, aufgenommen wurden, nähert sich dem Ende. Dies gilt insbesondere für den Fall der DVCS- und der semi-inklusiven DIS-Analyse, in welcher azimuthale Asymmetrien bezüglich der Richtung des virtuellen Photons gemessen wurden. Der Ursprung dieser azimuthalen Asymmetrien liegt in der quantenmechanischen Interferenz zwischen verschiedenen Amplituden begründet. Im Fall des DVCS-Prozesses ist der Endzustand identisch mit dem des Bethe-Heitler-Prozesses, d.h. die Amplituden interferieren. Im Fall des semi-inklusiven DIS-Prozesses interferieren verschiedene Reaktionsmechanismen zwischen dem gemessenen Hadron im Endzustand und den Fragmenten des Nukleons. Man bezeichnet diese Methode auch als QCD Interferometrie. Messungen dieser Art, speziell an transversal polarisierten Nukleonen, sind von großem Interesse.

Die Analyse von HERMES Daten, die in der tiefinelastischen Streuung an schweren Kernen genommen wurden, hat wesentlich zu unserem Verständnis der Wechselwirkung von schnellen Quarks mit den sie umgebenden Kernen beigetragen, speziell, wenn man sie mit der Hadronisierung von Quarks im Vakuum vergleicht. Darüber hinaus testen diese Daten verschiedene Modelle, welche momentan benutzt werden, um die harten hadronischen Proben eines neuen Zustands der Materie in der *Quantenchromodynamik* (QCD) zu verstehen. Dieser neue QCD Zustand wird momentan in Kollisionen am relativistischen Schwerionenbeschleuniger (*Relativistic Heavy Ion Collider*, RHIC) am *Brookhaven National Laboratory* (BNL) untersucht und soll in Kürze auch in Kollisionen am *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN erzeugt werden. Basierend auf dem sehr großen HERMES Datensatz wurde 2007 ein umfangreicher Artikel in der Zeitschrift Nuclear Physics B veröffentlicht.

Hinsichtlich des Beitrages der verschiedenen Quarks, insbesondere der Strange-Quarks, zum Gesamtdrehimpuls des Protons wurden mehrere neue Ergebnisse basierend auf den Daten aus den Jahren 1996–2000, in denen longitudinal polarisierte Wasserstoff und Deuterium Targets verwendet wurden, erzielt. Die Veröffentlichung dieser nahezu vollständigen Analysen wird für 2008 erwartet.

Meilensteine der HERMES-Physik

Semi-inklusive azimuthale Einzelspin-Asymmetrien

In der Feynmanschen Beschreibung der Nukleonstruktur, dem Partonmodell, bestehen Nukleonen (Protonen und Neutronen) aus sich annähernd kollinear bewegenden Partonen (Quarks und Gluonen). Deren Spinausrichtung führt zu drei Verteilungsfunktionen für Quarks und zwei für Gluonen. Von den drei Quarkverteilungen wurden bisher, mit unterschiedlicher Präzision, die spin-unabhängige Quarkverteilung und die Helizitätsverteilung gemessen. Erstere gibt an, wieviele Quarks mit einem bestimmten Impulsbruchteil² x im Nukleon zu finden sind. Bei der Helizitätsverteilung betrachtet man zusätzlich die Spinausrichtung der Quarks, die parallel oder antiparallel zum Nukleonspin liegen kann,

²Skalen- bzw. Bjorken-Variable.



Abbildung 57: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusiven azimuthalen Asymmetrien von Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im sogenannten Sivers-Winkel, welche proportional zur Sivers Quarkverteilung sind, in Abhängigkeit von Bjorken-x, dem Energiebruchteil z, der vom virtuellen Photon auf das Hadron übertragen wurde, und dem transversalen Impuls des Hadrons $P_{h\perp}$.

wenn dieser entlang der Bewegungsrichtung zeigt. Die dritte Verteilung, *Transversity*, entzog sich der Aufmerksamkeit für lange Zeit, da transversale Spineffekte als unterdrückt angesehen wurden. Erst in den letzen 15 Jahren bekam die *Transversity*-Verteilung, welche die Differenz in der Anzahl von Quarks mit Spin parallel bzw. antiparallel zum Spin von transversal polarisierten Nukleonen angibt, die verdiente Aufmerksamkeit.

Die Messung der *Transversity*-Verteilung wird dadurch erschwert, dass die Verteilung ungerade unter Chiralitätsumkehr ist. Da in harten Streuprozessen die Chiralität eine Erhaltungsgröße ist, muss die *Transversity*-Verteilung mit einer weiteren chiral-ungeraden Größe kombiniert werden. In der semi-inklusiven tiefinelastischen Streuung von Positronen (Elektronen) an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget, wie z. B. am HERMES-Experiment realisiert, können chiral-ungerade Fragmentationsfunktionen diese Aufgabe übernehmen. Fragmentationsfunktionen beschreiben die Entwicklung vom getroffenen Quark zu den verschiedenen produzierten Hadronen. Diese hängt in der Regel nicht nur von der Energie der produzierten Hadronen ab, sondern auch von deren Bewegungsrichtung. Für



Abbildung 58: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusiven azimuthalen Asymmetrien von Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im sogenannten Collins-Winkel, welche proportional zur Transversity-Verteilung sind, in Abhängigkeit von Bjorken-x, dem Energiebruchteil z, der vom virtuellen Photon auf das Hadron übertragen wurde, und dem transversalen Impuls des Hadrons $P_{h\perp}$.

die Messung der *Transversity*-Verteilung benötigt man Fragmentationsfunktionen, die von der Quarkpolarisation abhängen. Diese Abhängigkeit kann z. B. eine Korrelation der Bewegungsrichtung der produzierten Hadronen mit der Richtung des Quarkspins sein. Die Kombination aus *Transversity* und solch einer Fragmentationsfunktion führt zu Einzelspin-Asymmetrien in der azimuthalen Verteilung der produzierten Hadronen. Beispiele dafür sind die sogenannten *Collins*-Asymmetrie (mindestens ein Hadron nachgewiesen) und verschiedene Asymmetrien in der Hadronpaar-Produktion. Zur Überraschung vieler fand man vor wenigen Jahren heraus, dass nicht nur Fragmentationsfunktionen zu Einzelspin-Asymmetrien führen können, sondern auch eine bestimmte Klasse von Quarkverteilungsfunktionen. Diese Quarkverteilungen berücksichtigen die geringe Abweichung der Bewegungsrichtung der Quarks im Nukleon von der Bewegungsrichtung des Nukleons. Da ein nicht verschwindender Bahndrehimpuls der Quarks innerhalb des Nukleons solch eine transversale Komponente verursachen kann, ist die Hoffnung groß, dass man mithilfe dieser Quarkverteilungsfunktionen einen experimentellen Zugang zum Bahndrehimpuls erhält. Dies ist besonders interessant, da es nur wenige bekannte Alternativen gibt, die eine Messung des Bahndrehimpulses der Quarks ermöglichen. Folglich wird der Messung z. B. der sogenannten *Sivers*-Asymmetrie in semi-inklusiver tiefinelastischer Streuung große Aufmerksamkeit gewidmet. Namengebend für diese Asymmetrie ist die sie verursachende *Sivers*-Quarkverteilung.

Ein Meilenstein des HERMES-Physikprogramms im Jahr 2007 war die Bestätigung der weltweit ersten Ergebnisse für die Collins- und Sivers-Asymmetrien, die Anfang des Jahres 2005 veröffentlicht wurden, durch die erheblich höhere Präzision der Analyse des vollständigen Datensatzes an einem transversal polarisiertem Target. Zudem wurden erstmalig Asymmetrien für neutrale Pionen vorgestellt. In Abbildung 57 sieht man die vorläufigen Ergebnisse für die Sivers-Asymmetrien, welche aus den in den Jahren 2002–2005 aufgenommenen Daten extrahiert wurden. Für positive Pionen (π^+) ist die Asymmetrie signifikant von Null verschieden. Da π^+ Mesonen vorrangig durch Streuung an Up-Quarks entstehen, kann man daraus ableiten, dass auch die Sivers-Quarkverteilung für Up-Quarks von Null verschieden sein muss. Die Asymmetrien für negative Pionen (π^{-}) ist verträglich mit Null; die weltweit erste Messung für neutrale Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget ist verträglich mit den Resultaten für geladene Pionen. Zusätzlich zur Abhängigkeit der Asymmetrie von x und z, dem Energiebruchteil des während der Streuung ausgetauschten virtuellen Photons, der auf das Hadron übertragen wurde, wurde dieses Mal auch die Abhängigkeit vom transversalen Impuls $P_{h\perp}$ des Hadrons untersucht. Wie erwartet, steigt die Asymmetrie für größer werdendes $P_{h\perp}$ an. Die vorläufigen Ergebnisse für die Collins-Asymmetrie sind in Abbildung 58 gezeigt. Auch hier wurden die ursprünglichen Ergebnisse bestätigt, die nur auf der Analyse der Daten des ersten Jahres mit transversal polarisiertem Target beruhten. Insbesondere die großen Asymmetrien für negative Pionen überraschten damals und können nur damit erklärt werden, dass Pionen mit unterschiedlicher Ladung vorzugsweise in entgegengesetzte Richtungen emittiert werden, wenn sie in der Fragmentation von Quarks der gleichen Sorte entstehen. Auch für die *Collins*-Asymmetrie wurde zusätzlich die $P_{h\perp}$ -Abhängigkeit untersucht, was zusätzliche Einblicke in den Fragmentationsprozess liefert.

Die Analyse des vollständigen Datensatzes mit einem transversal polarisiertem Target ermöglicht das vertiefende Studium der *Transversity-* als auch der *Sivers-*Verteilung.

Hadronisierung in der Umgebung des Kernes

Hadronisierung beschreibt den Prozess, in dem die in der Teilchenreaktion erzeugten Partonen in die experimentell beobachteten Hadronen umgewandelt werden. Theoretischen Abschätzungen zufolge findet dieser Prozess über Längenskalen zwischen weniger als einem Femtometer und einigen zehn Femtometern statt. Auf diesen Längenskalen können perturbative Methoden wegen der Größe der starken Kopplungskonstanten nicht angewendet werden und Gitter-QCD Rechnungen sind noch nicht weit genug fortgeschritten, um neue Erkenntnisse beizusteuern.

Der Prozess der Hadronisierung im freien Raum (Vakuum) wurde ausführlich in e⁺e⁻ Vernichtungsprozessen studiert. Dank dieser Experimente sind die Spektren der produzierten Hadronen und deren kinematische Abhängigkeiten gut bestimmt. Über die raumzeitliche Entwicklung des Prozesses ist hingegen wenig bekannt, da die Reaktionsprodukte nur im Detektor beobachtet werden können, welcher immer einen makroskopischen Abstand zum Wechselwirkungspunkt hat. Im Gegensatz dazu kann das nukleare Medium als Detektor benutzt werden, welcher sich direkt am Ort der mikroskopischen Wechselwirkung befindet. Die Leptoproduktion von Hadronen an Atomkernen bietet daher eine gute Möglichkeit, das raumzeitliche Bild des Hadronisierungsprozesses zu studieren. Die Verwendung von Atomkernen wachsender Größe erlaubt es, die zeitliche Entwicklung des Hadronisierungsprozesses zu studieren. Falls die Hadronisierung schnell von statten geht, d. h. die Hadronen werden auf Längenskalen

produziert, die kleiner sind als die Atomkerne, beruhen die relevanten Wechselwirkungen im nuklearen Medium auf bekannten hadronischen Wirkungsquerschnitten wie die der Pion-Nukleon Wechselwirkung. Falls im Gegensatz dazu die Hadronisierung über große Abstände hinweg stattfindet, sind die relevanten Wechselwirkungen partonisch und beinhalten die Abstrahlung von Gluonen und Quark-Antiquark Paaren. Die beiden Mechanismen führen zu verschiedenen Vorhersagen für die Verringerung der Anzahl an produzierten Hadronen an den Atomkernen, verglichen mit der Produktion an freien Nukleonen. Dieser Effekt wird auch als *attenuation* bezeichnet.

Die HERMES-Kollaboration hat im Jahr 2007 den bisher umfassendsten Datensatz über die Messung semiinklusiver tief-inelastischer Streuprozesse an Deuterium, Helium, Krypton und Xenon veröffentlicht. Die Ergebnisse sind zum einen wichtig für das Verständnis der Hadronisierung und schränken andererseits die zur Verfügung stehenden phänomenologischen Modelle stark ein. Diese Modelle sind nicht nur für die tiefinelastische Streuung wichtig, sondern werden auch gebraucht, um den Ubergang vom Parton zum Hadron in relativistischen Schwerionenkollisionen, und damit die Eigenschaften des in diesen Kollisionen neu entstehenden Materiezustandes, zu verstehen. Die von der HERMES-Kollaboration durchgeführte Messung ist von besonderer Bedeutung, da es möglich war, die attenuation als Funktion mehrerer kinematischer Variablen zu messen, wobei die Statistik groß genug war, um zwei-dimensionale Verteilungen zu extrahieren. Alle früheren Messungen hatten die attenuation als Funktion einer Variable dargestellt, wobei immer über die anderen Variablen integriert wurde.

Die Hadronen Multiplizitäten an einem Kern A relativ zu denen am Deuteron, R_A^h , wurden gemessen für verschiedene Hadronen (π^+ , π^- , π^0 , K^+ , K^- , p und \bar{p}) als Funktion der Energie des virtuellen Photons v, als Funktion des Bruchteils dieser Energie z, die auf das produzierte Hadron übertragen wurde und als Funktion der Photon-Virtualität Q² und des quadrierten transversalen Impulses des Hadrons p_t^2 (siehe Abbildung 59 für die Definitionen). Auch wenn es noch kein quantitatives Verständnis des Prozesses der Hadronisierung gibt, so wird im allgemeinen angenommen, dass die folgenden Prozesse von zentraler Bedeutung in der Leptoproduktion von Hadronen sind. Das Quark im Nukleon verliert nach der Absorption des Photons Energie durch die Streuung an anderen Quarks und durch die Abstrahlung von Gluonen, welches die Größe von R_A^h beeinflussen kann. Im Abstand lc vom Ort der elementaren Wechselwirkung, der sogenannten Formationslänge, kann ein farbloses Objekt (oder ein farbloser neutraler Zustand), ein sogenanntes pre-hadron, entstehen, welches schon die Quantenzahlen, aber noch nicht die vollständig entwickelte Wellenfunktion des Hadrons besitzt. Der Mittelwert der Formationslänge l_c wird als L_{c} bezeichnet. Er hängt von den Variablen v und z ab und ist im Lund Modell durch $L_c = f(z) \frac{v}{\kappa}$ gegeben, wobei f(z) eine Funktion mit einem 1 - z Verhalten für große Werte von z ist, und κ die string tension bezeichnet, welche den Energieverlust des führenden Quarks pro Längeneinheit wiedergibt. Das pre-hadron entwickelt sich dann über eine bestimmte Zeitperiode in das physikalische Hadron. Diese Zeitperiode wird im Rahmen des Lund Modells mit L_h/c angegeben, wobei c die Lichtgeschwindikeit ist und $L_h = L_c + \frac{zv}{\kappa}$.

Für den besonders großen Datensatz an gemessenen Pionen wurden zwei-dimensionale Verteilungen ermit-



Abbildung 59: Kinematische Ebenen für die Hadron Produktion in semi-inklusiver tief-inelastischer Streuung, sowie die Definitionen der relevanten Variablen für das Lepton und das Hadron. Die Größen $k = (E, \tilde{k})$ und $k' = (E', \tilde{k}')$ sind die Viererimpulse des einlaufenden und des gestreuten Leptons, (E_h, \tilde{p}_h) ist der Viererimpuls des produzierten Hadrons, und \tilde{p}_t ist der transversale Impuls des Hadrons.



Abbildung 60: Werte für $R^{\pi}_{A}(\nu, z)$ für He, Kr, Ne und Xe als Funktion der Variablen L_c . Die verschiedenen ν -Bereiche sind durch verschiedene Symbole verdeutlicht. Die verschiedenen Messungen innerhalb des gleichen ν -Bereichs unterscheiden sich durch den Wert von z in den Grenzen 0.2–0.3–0.4–0.5–0.6–0.7–0.8–0.9–1.0, wobei der Wert von z von links nach rechts abnimmt. Die gezeigten Fehlerbalken sind statistisch. Der dominierende systematische Fehler ist eine Skalenunsicherheit von ca. 3%.

telt. Diese geben Hinweise darauf, dass die Abhängigkeit von R_A^h von v und z im Wesentlichen als Abhängigkeit von der einzelnen Variable L_c beschrieben werden kann, wie man in Abbildung 60 erkennen kann. Für den Fall $L_c < R$, wobei R der Kernradius ist, wird das *pre-hadron* im wesentlichen innerhalb des Kerns produziert und kann damit Wechselwirkungen im Endzustand erfahren. Als Folge daraus ändert sich das nukleare *attenuation* Verhältnis R_A^h beträchtlich als Funktion von L_c . Im Gegesatz dazu wird im Fall $L_c > R$ das *pre-hadron* im Wesentlichen außerhalb des Kerns produziert und R_A^h ändert sich weit weniger stark als Funktion von L_c .

Die große Statistik in Kombination mit dem großen Spektrum an nuklearen Targets erlaubt weiterhin eine detaillierte Untersuchung der Abhängigkeit von der Kernladungszahl A. Die A-Abhängikeit von R_A^h wurde als Funktion von v, z und L_c gemessen. Die Abhängigkeit folgt im Wesentlichen einer Form A^{α} mit $\alpha \approx 0.5-0.6$. Die Werte für α sind weitaus kleiner als von Modellen vorhergesagt, die annehmen, dass die *attenuation* vom Quadrat des Weges, den das Parton durch den Kern zurücklegt, abhängt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der sehr große gesammelte Datensatz eine wesentliche Hilfe beim Erstellen von Hadronisierungsmodellen sein wird. Eine komplette theoretische Beschreibung der Hadronisierung in nuklearer Umgebung in einem konsistenten Rahmen, welche sowohl partonische als auch hadronische (Absorption und Mehrfachstreuungen) Mechanismen beinhaltet, wird dringend gebraucht. Die hier präsentierten Daten werden dazu beitragen, das Verständnis nicht-perturbativer QCD entscheidend zu verbessern.